第 38 卷第 10 期
2018 年 5 月

生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol.38,No.10
May,2018

DOI:10.5846/stxb201708161478
马婧怡,贾宁凤,程曼.黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤水分变化特征.生态学报,2018,38(10):3471-3481.
Ma J Y, Jia N F, Cheng M.Water characteristics of soil under different land-use types in the Loess Plateau region.Acta Ecologica Sinica,2018,38(10):3471-3481.

黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤水分变化特征

马婧怡[1],贾宁凤[1,*],程 曼[2]
1 山西大学黄土高原研究所,太原 030006
2 山西省农业科学院农业环境与资源研究所,太原 030006

摘要:选择黄土丘陵区砖窑沟流域不同土地利用方式为研究对象,在 2016 年 6 月至 11 月对 0—300 cm 土层土壤含水量进行监测,分析刺槐林、草地、柠条灌木林、小叶杨林、海红林和撂荒地 6 种土地利用方式下土壤含水量的垂直剖面分布特征、土壤贮水量的季节变异特征。结果表明:(1)土壤含水量随深度的变化自上而下均呈"S"状分布,随着土层深度的增加,土壤含水量呈先增加后减小的趋势,具有明显的垂直变异特征。(2)不同土地利用方式具有不同的土壤湿度剖面,土壤水分活跃层、次活跃层、相对稳定层的深度范围不同。(3)6 种土地利用方式下各土层的土壤贮水量均具有明显的季节变化特征,海红林的土壤贮水量最大,为 258.21 mm,然后依次为小叶杨林、撂荒地、草地和刺槐林,柠条灌木林样地最小;监测期内土壤贮水量随时间呈增长趋势,在 11 月达到最大值。土壤含水量的变异系数均随着土层深度的增加逐渐递减,在 100 cm 以下土壤深层季节变异趋于稳定。研究认为,乔灌林消耗更多深层的土壤水分,柠条灌木林易引起土壤干燥化,海红林的土壤水分条件较好,撂荒地和草地土壤水分条件相对稳定。

关键词:黄土丘陵;土壤水分含量;土壤贮水量;土壤深度;土地利用类型

Water characteristics of soil under different land-use types in the Loess Plateau region

MA Jingyi[1], JIA Ningfeng[1,*], CHENG Man[2]
1 *Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan* 030006, *China*
2 *Institute of Agricultural Environment and Resources, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan* 030006, *China*

Abstract: This study investigated the effect of different land use types upon soil water content in the Loess Plateau region, China. The water of soil from different land-use types was examined from the depth of 0—300 cm at 20 cm intervals from June to November 2016. The temporal distribution characteristics of soil water content and seasonal variation of soil water storage capacity of six land-use types were analyzed. Those different land-use types included the growth of *Robinia pseudoacacia* L., *Caragana korshinskii* Kom., *Populus simonii* Carr., or *Malus micromalus* Makino, and grassland or abandoned land. The results showed that:(1) The soil water content increased at first, and then decreased with the depth of the soil.(2) The depth range of the active layer, the secondary active layer and the relatively stable layer of the soil in different land-use types was different.(3) The water storage capacity of each soil layer under the six land use types had obvious seasonal variation. The highest soil water storage capacity of the six land use types was 258.21 mm, which was *M. micromalus* Makino, followed by *P. simonii* Carr., abandoned land, grassland and *R. pseudoacacia* L. The soil water storage capacity of *C. korshinskii* Kom. was the lowest. During the monitoring period, soil water storage generally increased, and it reached the maximum in November. The coefficient of variation of soil water content gradually decreased with the depth of

基金项目:青年科学基金项目(41301609)
收稿日期:2017-08-16; **修订日期:**2018-03-10
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: jianf@ sxu.edu.cn

soil layer. At a depth of 100 cm, the coefficient of variation of soil water content was stable. The results showed that trees and shrubs consumed more deep soil water, and *C. korshinskii* Kom. may lead to soil desiccation. *M. micromalus* Makino had a fine soil water condition. The soil water condition of abandoned land and grassland is relatively stable.

Key Words: Loess Plateau; water content; soil water storage; soil depth; land-use type

土壤水分是土壤、植被、大气相互联系的关键因子,是土壤系统中物质和能量循环的重要载体,对土壤的特性、植被生长状况及其分布格局以及地域生态系统有着重要的影响[1]。黄土丘陵区属于干旱半干旱地区,降水资源紧缺,植被稀疏,水土流失严重,区域植被恢复困难[2]。目前,随着大规模植被恢复的不断推进,黄土丘陵区形成了乔木、灌木、草地等,由于晋西北黄土丘陵区气候寒冷、干旱、多风沙、立地条件较差,经旱、寒气候等条件的自然选择,天然林极为稀少。目前,主要的人工栽培树种主要有小叶杨林、华北落叶松、油松、樟子松、新疆杨、旱柳、各类杂交杨、杏、苹果、海棠果、沙棘和柠条灌木林锦鸡儿等[3]。然而,大片"小老头"树等情况的出现,说明人工植被在生态恢复的进程中可能存在一些问题。人工植被的恢复导致土壤水分的过度干旱,造成土壤干燥化,降雨、土壤、地形、植被和不同土地利用方式等均对土壤水分产生重要影响,同时也影响地表蒸发、地表径流和植被蒸腾等[4]。通过了解土壤水分状况,掌握不同土地利用方式下土壤水分动态及水分利用效率,对于改善黄土丘陵区的生态环境有着极为重要的意义。

近年来,黄土丘陵区的土壤水分问题越来越受到研究者的关注。王艳萍等对黄土塬区的典型地区长武塬区不同土地利用方式下 0—600 cm 剖面土壤水分分布特征进行了研究,并分析了不同土地利用方式下土壤水分的补充深度与消耗深度[5];莫保儒等对半干旱黄土区成熟柠条林地不同坡向土壤水分分布特征进行了分析,研究了剖面土壤水分变异、动态平衡及其影响因素[2];刘春利等在研究黄土高原六道沟流域的土壤水分时,采用地统计学中交互相关系数的方法,分析了不同土地利用方式下不同水分时期土壤剖面饱和导水率和水分含量的交互相关性,并建立土壤水分特征曲线[6];白一茹等也在对黄土高原水蚀风蚀交错带不同土地利用方式下坡面土壤水分特征进行研究,并采用土壤水分特征曲线拟合的方法,结果表明苜蓿地的土壤持水能力大,杏树次之,谷子地较弱[7];张北赢等采用灰色关联度分析法,研究了黄土丘陵区梯田、白羊草、刺槐、沙棘等不同土地利用方式下各层土壤水分的状况以及各月动态变化[8];王国梁等针对黄土丘陵区安塞县纸坊沟流域不同土地利用方式下的土壤含水率,分析了坡度、土壤稳定入渗速率、作物蒸腾耗水量、生物量等影响因子[9];高鹏等采用双环法和人工降雨法,研究了黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤水分入渗规律[10];程立平等对黄土塬区不同土地利用方式下 0—20 m 剖面质地和持水特性进行了研究,并分析了土壤剖面水分分布特征及其与土壤质地的关系[11];夏江宝等总结了影响土壤入渗的外界条件,表明林分和土地利用方式均为影响土壤入渗的重要因子,其中灌木林提高土壤入渗的能力最强,其次是刺槐林和油松林,而土地利用方式通过影响土壤孔隙度等物理性质来影响土壤入渗能力[12];贾宁凤等基于 AnnAGNPS 模型对黄土高原砖窑沟流域的土壤侵蚀定量评价中模拟了不同土地利用状况下的土壤侵蚀量及其空间分布,为进一步研究砖窑沟流域不同土地利用方式下的土壤水分奠定了良好的基础[13]。

目前,针对土壤水分的相关问题已做了大量研究,而将黄土丘陵区乔、灌、草结合起来研究土壤水分状况则相对缺乏,针对黄土丘陵区典型的 6 种土地利用方式下土壤水分状况的综合研究少见报道。本研究以晋西北黄土丘陵区中的典型地区砖窑沟流域为研究区域,选取刺槐林、草地、柠条灌木林、小叶杨林、海红林、撂荒地等 6 种土地利用方式作为研究对象,系统分析了集中降雨期不同土地利用方式下 0—300 cm 土层土壤水分变化,试图摸清其水分活动层分布特征,以揭示不同土地利用方式下土壤水分的垂直分布特征和季节变化特征,为提高该区水资源利用率提供科学依据,为黄土丘陵区植被恢复与配置提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究选取砖窑沟流域作为研究区域。砖窑沟流域位于山西省河曲县中西部,西隔黄河,与陕西黄浦川

相对,北与南曲沟相邻,南与县川河相连,地理坐标为 39°11′06″N—39°13′47″N,111°12′03″E—111°19′28″E,流域面积为 28.7 km^2。研究区位于砖窑沟流域的沙坪乡,海拔 840—1243 m,黄土裸露,丘陵沟壑纵横,水土流失严重,属于黄土丘陵区。气候属于暖温带大陆性季风气候,年均温 8.8℃,≥10℃积温 3360℃,无霜期 140 d 左右。年平均降水量 447 mm,其中一半以上集中于 7、8 两月,年际变率达 60;年蒸发量 1913.7 mm,干燥度约 1.5。年平均风速 1.64 m/s,年平均大风日数 87.2 d,春季最为频繁,西南风为主要风向。土壤主要为栗褐土,主要特点是:成土母质以黄土为主体,结构单一,质地较轻,通体型构型较多,结构多以屑粒、碎块状为主,孔隙发达,通透性好,有一定的持水能力[14]。

1.2　样地选择

2016 年 5 月,基于已有研究[15],并结合对砖窑沟流域主要土地利用类型的遥感影像图的查阅和实地调查,选取不同的林、灌、草等 6 块样地。其中,人工林有刺槐林、小叶杨林、海红林三种,灌木有柠条灌木林,草地为当地长势较好的荒草地,选择 20 年的撂荒地作为对照,撂荒地植物种类主要有:大针茅、铁杆蒿、百里香、赖草、茭蒿、阿尔泰狗娃花等。样地的地理位置见图 1,样地的基本情况见表 1。

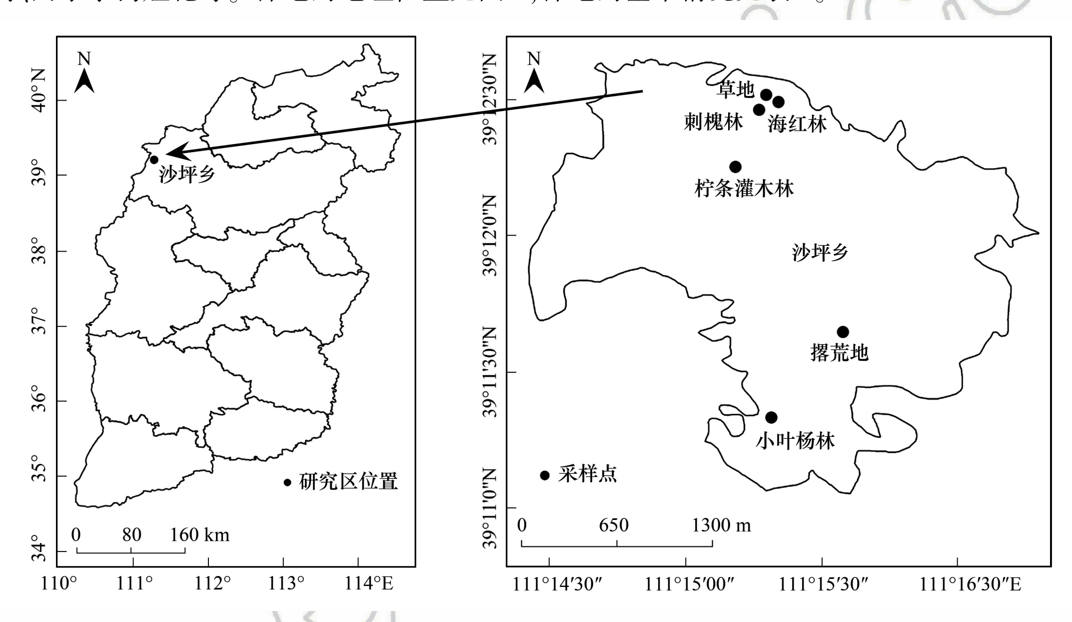


图 1　研究区地理位置及采样点分布

Fig.1　The map of study area and sampling sites

表 1　样地基本情况

Table 1　Basic information of experimental sample plots

样地类型 Sample plots	海拔 Elevation/m	坡度 Gradient/°	坡向 Aspect	面积 Area/hm^2	林龄 Forest age/a	树高 Tree height/m	胸径 DBH/cm	林分 Tree density/(株/hm^2)	盖度 Coverage/%
刺槐林 *Robinia pseudoacacia* L.	1107	45°	阳坡	0.2196	15	3	10	900	40
草地 grassland	1106	4°	半阳坡	0.1084	—	0.15	—	—	90
柠条灌木林 *Caragana korshinskii* Kom.	1076	2°	阳坡	3.1725	16	1.1	3	2000	75
小叶杨林 *Populus simonii* Carr.	1055	70°	半阴坡	0.3981	20	6	8	1100	60
海红林 *Malus micromalus* Makin	998	30°	半阳坡	0.1577	18	3	18	600	50
撂荒地 abandoned land	1106	15°	半阳坡	0.1503	20	0.4	—	—	80

1.3 试验设计

于2016年6月、7月、8月、9月、11月的下旬分别测定各样地的土壤含水量。每块样地随机取样,3次重复,用内径5 cm的土钻以20 cm为间隔取0—300 cm土层的土壤样品,将各层土壤样品装入铝盒中,带回实验室,采用烘干法,在105—108 ℃下烘烤8 h至恒重,测定各土壤样品的含水量,每层土壤含水量取其算术平均值。采用环刀法测定0—100 cm土层的容重,以20 cm为间隔,3次重复,取平均值。100 cm以下土层的容重参照80—100 cm土层的容重[16]。另外,期间利用雨量筒计测定降水量。2016年降水量为471 mm,属正常年。2016年6月—11月研究期间,降水主要集中在7—8月,并在7月出现峰值,降水量为118 mm,占全年降水量的25.05%。

1.4 数据处理

土壤质量含水量和贮水量的计算公式分别为公式1和公式2,

$$土壤质量含水量(\%)=(W_2-W_3)/(W_3-W_1)\times 100 \quad (1)$$

式中,W_1为干燥铝盒的重量(g),W_2为湿土加铝盒的重量(g),W_3为烘干土加铝盒的重量(g)。

$$W_C=\theta_m\times\rho\times h\times 10 \quad (2)$$

式中,W_C为土壤贮水量(mm),θ_m为土壤质量含水量,ρ为土壤体积质量(g/cm^3),h为土层深度(cm)。

文中所有数据利用Microsoft Excel、SPSS 17.0和Origin 2017统计分析软件对试验数据进行统计分析与作图,应用标准差法研究季节变异特征。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式下土壤水分的垂直剖面分布特征

图2、表2分别显示6种土地利用方式分别在6月、7月、8月、9月、11月垂直剖面的土壤含水量分布特征和标准差。总体来看,不同土地利用方式之间土壤水分剖面具有共同的特征,即土壤含水量随深度的变化,自上而下呈"S"状分布,随着深度的增加,土壤含水量呈现先增加后减少的趋势,且在0—100 cm土层土壤含水量随深度的变化剧烈,越到深层,土壤含水量随土壤深度的变化明显减弱。其中,刺槐林各月份土壤含水量变化趋势基本一致,0—120 cm土层各月份土壤含水量变化较大,并且在垂直方向上,土壤水分先随着土壤深度的增加而递增,后随着土壤深度的增加而快速递减,在120—300 cm土层达到稳定状态。草地0—300 cm土层各月份土壤含水量变化趋势基本一致,且在剖面上部土壤含水量随时间变化剧烈,下部含水量随时间变化较小,土壤剖面自上而下呈典型的"S"分布,在0—140 cm土层范围内,土壤含水量呈现先增加后减少的趋势,在140—300 cm土层土壤含水量呈缓慢上升而又缓慢降低的趋势,在300 cm土层达到最低值。柠条灌木林各月份土壤含水量均低于其他样地,在0—140 cm土层土壤含水量较高且随着土层加深而快速降低,至140 cm土层达到稳定状态,140—300 cm土层土壤含水量基本稳定在2.1%左右,其中,9月份土壤含水量处于较低值,11月土壤含水量较高。小叶杨林从总体来看,土壤含水量均较高,其中0—140 cm土层各月份土壤含水量变化较大,存在明显差异,140—300 cm土层土壤含水量达到稳定状态,在300 cm土层附近土壤含水量略有升高的趋势。海红林各月土壤含水量均高于其他土地利用方式,且各月土壤含水量的垂直变化特征较一致,在0—60 cm土层土壤含水量随着深度的增大而增大,土壤含水量最大值出现在60 cm土层处,在60—180 cm土层土壤含水量随着土层深度的加深而快速递减。作为对照样地的撂荒地,在0—140 cm土层土壤含水量随着深度的增加而递减,在140—300 cm土层土壤含水量稳定在4.5%左右。

2.2 不同土地利用方式土壤水分活动层分布

根据标准差(SD)判别法:即SD>1.5%、1%<SD<1.5%、SD<1%这3个等级,土壤湿度剖面自上而下可以划分为水分活跃层、水分次活跃层和水分相对稳定层[17]。通过0—300 cm土层土壤水分垂直分布曲线可以看出,不同土地利用方式之间土壤水分剖面具有共同特征,即剖面上部含水量变化剧烈,下部含水量变化较小。在干湿季明显的气候条件下,黄土剖面上层的土壤处于水分消耗、补充的交替过程中,土壤含水量波动剧

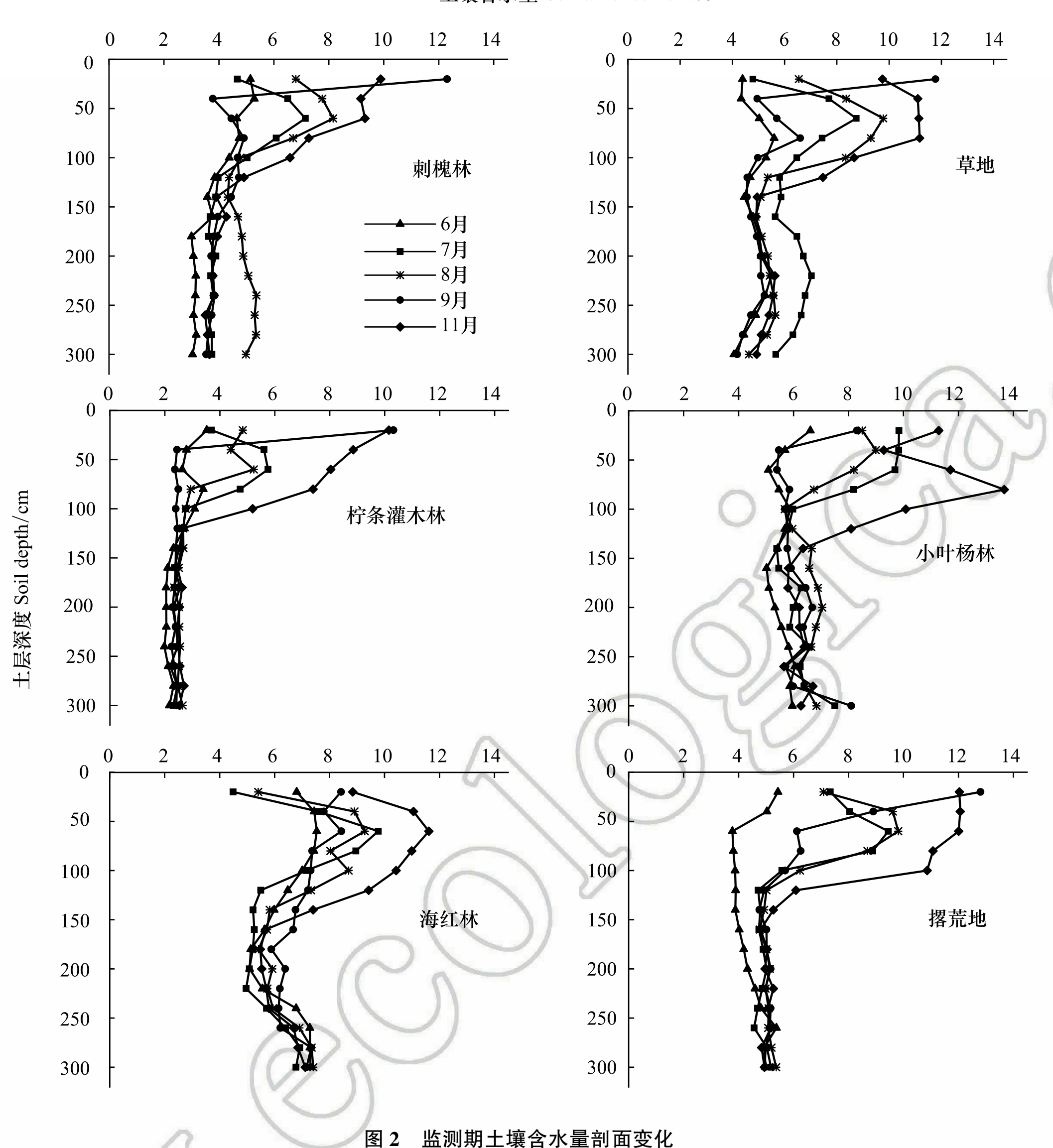


图 2　监测期土壤含水量剖面变化

Fig.2　The sectional change characteristics of soil water content in monitoring period

烈,称为活跃层,SD 值>1.5%,不同的土地利用方式下土壤活跃层深度范围不同。从表 3 可知,草地、小叶杨林、撂荒地的活跃层较深,均在 0—100 cm 土层;刺槐林样地的活跃层在 0—60 cm 土层,柠条灌木林的活跃层在 0—80 cm 土层,海红林的活跃层在 0—60 cm 土层。活跃层以下的黄土剖面,土壤水分变化较活跃层缓慢,SD 值在 1%—1.5%之间,该层为次活跃层。通过表 3,可以看出刺槐林、草地、柠条灌木林、小叶杨林这 4 种土地利用方式的次活跃层的厚度均为 20 cm,仅海红林样地的次活跃层厚度为 60 cm,深度同草地、小叶杨林一样达 120 cm;撂荒地在此次划分中并没有次活跃层。在次活跃层以下的黄土剖面,SD 值<1%,土壤含水量变化很小,基本维持稳定,因此称之为相对稳定层。6 种土地利用方式下的土壤稳定层,其深度范围均较大,刺槐林的土壤相对稳定层深度范围最大,在 80—300 cm 土层范围内,柠条灌木林、撂荒地的土壤相对稳定层均在 100—300 cm 土层,草地、小叶杨林、海红林的土壤相对稳定层在 120—300 cm 土层。

2.3　不同土地利用方式下土壤水分的季节变化特征

如图 3 所示,在 2016 年 6—9 月、11 月对研究区刺槐林、草地、柠条灌木林、小叶杨林、海红林、撂荒地 0—300 cm 土层土壤水分的监测表明,刺槐林、草地、柠条灌木林、小叶杨林、海红林、撂荒地 6 种土地利用方式总的土壤贮水量由大到小依次为海红林>小叶杨林>撂荒地>草地>刺槐林>柠条灌木林。总体来看,6 种土地利

表 2 监测期(6—11 月)不同土地利用方式下土壤含水量标准差

Table 2 Standard deviation of soil water content under different land use types(June—November)

深度 Depth/cm	刺槐林 *Robinia pseudoacacia* L.					草地 grassland					柠条灌木林 *Caragana korshinskii* Kom.					小叶杨林 *Populus simonii* Carr.					海红林 *Malus micromalus* Makin					撂荒地 abandoned land				
	6	7	8	9	11	6	7	8	9	11	6	7	8	9	11	6	7	8	9	11	6	7	8	9	11	6	7	8	9	11
0—20	1.46	0.66	1.50	0.96	1.36	0.52	0.81	0.65	1.84	0.43	0.40	0.78	0.39	0.92	3.08	0.09	0.70	1.86	3.57	0.73	1.52	2.31	0.99	1.85	3.10	1.18	0.55	0.77	0.35	1.10
20—40	1.81	1.38	1.25	0.95	0.54	0.75	2.43	0.55	1.19	0.52	0.22	0.07	0.24	0.12	1.37	0.77	0.71	0.56	0.26	1.84	1.54	0.60	0.43	3.96	0.88	1.36	0.39	1.26	1.02	0.51
40—60	1.46	1.24	1.51	1.88	0.26	0.95	1.70	0.37	1.15	0.56	0.09	0.05	1.04	0.05	0.32	0.38	0.39	1.24	0.40	0.15	0.27	0.70	0.24	1.30	1.03	0.07	0.73	1.02	0.93	0.59
60—80	0.75	1.84	2.30	2.32	1.97	0.97	3.23	0.86	0.87	0.51	0.16	1.18	0.12	0.08	1.16	0.33	1.50	1.69	0.33	1.59	0.87	0.25	2.34	1.24	0.11	0.17	1.29	1.16	0.54	0.51
80—100	0.74	1.80	1.59	1.94	2.33	0.78	3.74	0.21	0.67	2.61	0.07	0.34	0.13	0.04	1.89	0.23	0.61	0.24	0.41	0.21	0.57	0.43	1.14	1.16	1.01	0.16	1.47	1.51	0.85	2.79
100—120	0.82	0.85	0.68	1.97	1.68	0.52	2.94	0.45	0.44	1.90	0.25	0.07	0.23	0.16	0.21	0.31	0.29	0.25	0.49	0.14	0.20	0.30	1.63	1.05	0.99	0.40	0.56	0.37	0.96	1.10
120—140	0.84	0.68	0.61	1.71	0.37	0.39	2.84	0.33	0.36	0.18	0.09	0.25	0.03	0.16	0.12	0.57	0.25	0.80	0.29	0.14	0.10	0.35	1.04	1.02	0.69	0.24	0.38	0.05	0.18	0.60
140—160	1.06	0.79	0.48	1.04	0.40	0.63	2.65	0.11	0.28	0.14	0.07	0.13	0.21	0.07	0.20	0.39	0.14	0.37	0.56	0.27	0.18	0.08	0.47	0.57	0.23	0.26	0.23	0.20	0.31	0.22
160—180	0.14	0.55	0.37	0.73	0.20	0.63	2.43	0.22	0.14	0.04	0.08	0.07	0.08	0.15	0.05	0.19	0.08	0.38	0.70	0.03	0.35	0.11	0.16	0.87	0.09	0.26	0.38	0.23	0.28	0.41
180—200	0.04	0.53	0.19	0.57	0.17	0.72	2.38	0.21	0.21	0.05	0.04	0.04	0.09	0.04	0.10	0.18	0.02	0.21	0.42	0.12	0.31	0.37	1.20	1.59	0.28	0.38	0.21	0.05	0.74	0.57
200—220	0.08	0.68	0.17	0.59	0.27	0.65	2.47	0.19	0.16	0.41	0.06	0.18	0.09	0.09	0.11	0.16	0.48	0.14	0.32	0.05	0.23	0.34	1.09	1.76	0.09	0.55	0.33	0.32	0.19	0.23
220—240	0.18	0.69	0.22	0.55	0.29	0.57	2.24	0.16	0.21	0.07	0.05	0.01	0.05	0.07	0.05	0.17	0.06	0.23	1.25	0.27	0.28	0.87	1.35	1.77	0.11	0.70	0.51	0.54	0.22	0.51
240—260	0.19	0.79	0.02	0.60	0.15	0.16	1.84	0.21	0.44	0.49	0.10	0.11	0.16	0.24	0.05	0.62	0.05	0.77	0.37	0.43	0.18	0.45	1.01	1.60	0.82	0.80	0.33	0.46	0.35	0.55
260—280	0.15	0.47	0.27	0.46	0.13	0.12	1.23	0.22	0.50	0.63	0.09	0.13	0.02	0.13	0.20	0.42	0.07	0.61	0.58	0.03	0.21	0.42	0.64	0.96	0.40	0.65	0.63	0.55	0.43	0.74
280—300	0.18	0.21	0.18	0.29	0.04	0.22	1.55	0.23	0.16	0.49	0.15	0.29	0.14	0.16	0.16	0.18	0.90	0.27	3.45	0.04	0.59	0.65	0.69	0.42	0.18	0.64	0.45	0.48	0.55	0.75

表 3　样地剖面土壤水分活动层范围(标准差(SD))

Table 3　The range of soil water active layer of profile in sample plot (standard deviation(SD))

样地 Sample plots	活跃层 Active layer		次活跃层 Secondary layer		相对稳定层 Relatively stable layer	
	SD	范围 Range/cm	SD	范围 Range/cm	SD	范围 Range/cm
刺槐林 *Robinia pseudoacacia* L.	2.14—3.26	0—60	1.10	60—80	0.35—0.87	80—300
草地 grassland	1.70—3.21	0—100	1.17	100—120	0.37—0.75	120—300
柠条灌木林 *Caragana korshinskii* Kom.	1.98—3.44	0—80	1.12	80—100	0.10—0.24	100—300
小叶杨林 *Populus simonii* Carr.	1.92—3.34	0—100	1.03	100—120	0.27—0.68	120—300
海红林 *Malus micromalus* Makin	1.50—2.13	0—60	1.45—1.48	60—120	0.24—0.85	120—300
撂荒地 abandoned land	2.62—3.27	0—100	-	-	0.19—0.78	100—300

用方式的土壤贮水量具有明显的季节变化特征,并且在 11 月达到最大值。其中,6 月,海红林的土壤贮水量最高,为 258.21 mm;7 月,小叶杨林的土壤贮水量最高,为 275.52 mm;8 月,小叶杨林的土壤贮水量仍居最高,为 273.92 mm;9 月,海红林的土壤贮水量最高,为 278.57 mm;11 月,小叶杨林的土壤贮水量最高,为 316.58 mm。在观测期内,刺槐林样地的土壤贮水量变化较稳定,最高值出现在 8 月,最低值出现在 6 月,9 月有所下降,11 月又一次上升;草地的土壤贮水量最高值出现在 11 月,最低值出现在 6 月,8 月较 7 月有所下降,9 月下降至谷底,11 月上升到最高值;柠条灌木林的土壤贮水量在 6 种土地利用方式中最低的,最高值出现在 11 月,最低值出现在 6 月,从 7 月开始至 9 月稳定减少,在 11 月达到最高值;小叶杨林的土壤贮水量最高,最高值在 11 月,最低值在 6 月,从 7 月到 8 月缓慢下降,到 9 月迅速下降至谷底,11 月土壤贮水量迅速上升至最高值,且在 11 月为 6 种土地利用类型中的最高值;海红林的土壤贮水量在观测期内的变化较为稳定,基本为上升的趋势,7 月为最低值,在 11 月达到最高值;撂荒地的土壤贮水量也较为稳定,在 11 月达到最高值,6 月为最低值,6 月到 8 月一直为增长状态,9 月略微有所下降,但在 11 月迅速上升为最高值。由图 3 可知,研究区的降雨量在 7、8 月达到一年中的高峰,7 月最高,8 月—9 月依次下降,10 月雨量突然升高,达到小高峰。总体来看,6 种土地利用方式 0—300 cm 土层总的土壤贮水量表现出明显的季节变化特征,分别在 8 月、11 月两次达到小高峰。

2.4　不同土地利用方式下土壤水分季节变异程度的分层特征

不同土地利用方式下各土层的土壤含水量季节变异系数见图 4。由图 4 可知,6 种土地利用方式下各土层的土壤含水量具有明显的季节变化特征。总体来看,不同土地利用方式的土壤含水量的变异系数均随着深度的增加呈现出逐级递减的趋势,在土壤深层季节变异趋于稳定。刺槐林在 0—20 cm 表层变异系数(CV)值最大,在 0—140 cm 土层持续降低,160 cm 土层处开始上升,在 160 cm—300 cm 土层范围内稳定在较低水平;草地的土壤表层同样具有最大 CV 值,土壤水分季节变异系数最大,在 0—160 cm 土层 CV 值持续降低,160—300 cm 土层 CV 值略有上升,在土壤深层基本维持稳定,土壤水分季节变异程度较低。柠条灌木林浅层与深层的土壤水分变异程度差异较大,同样,变异程度最大的仍出现在土壤表层,最低值在土壤深层,在 0—120 cm 土层土壤水分季节变异系数急剧下降,在 120 cm 土层达到最低值,120—300 cm 土层土壤水分变异系数基本稳定在最低值,土壤水分基本不受季节变化的影响,

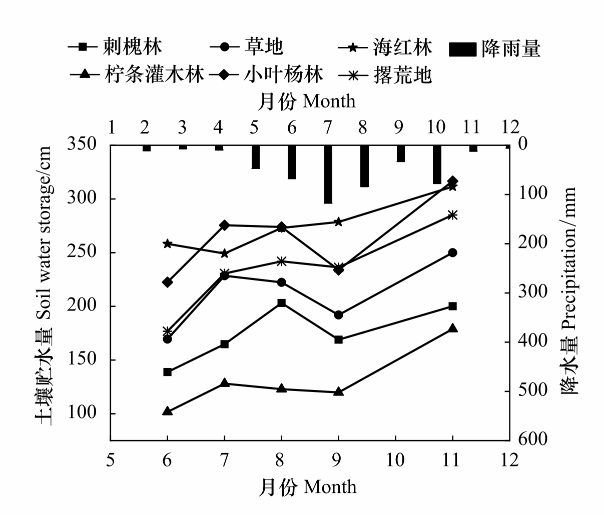


图 3　监测期不同土地利用方式土壤贮水量与降水量变化

Fig.3　The variation of soil water storage in different land-use types and precipitation

且深层土壤含水量极少,稳定在 2.5%左右。小叶杨林各测层的土壤含水量均较高,与其他土地利用方式不同的是,土壤水分季节变异系数最大值出现在 80 cm 土层处,从总体来看,土壤浅层仍是季节变异程度较大的土层,在 140—300 cm 土层范围内,土壤水分季节变异系数稳定在最低值左右。海红林的各土壤层的土壤水分含量较高,土壤水分季节变异系数最大值同样出现在 0—20 cm 土壤表层,土壤浅层季节变异程度大,土壤深层变异程度小,维持稳定,与其他土地利用方式不同的是,海红林在 40—120 cm 土层范围内的土壤水分季节变异系数基本一致且始终保持在较高值,在土壤深层变异系数降低,稳定在较低值。撂荒地土壤水分条件较好,含水量较高,土壤水分季节变异系数在土壤浅层具有较高值,在土壤深层稳定在较低值。

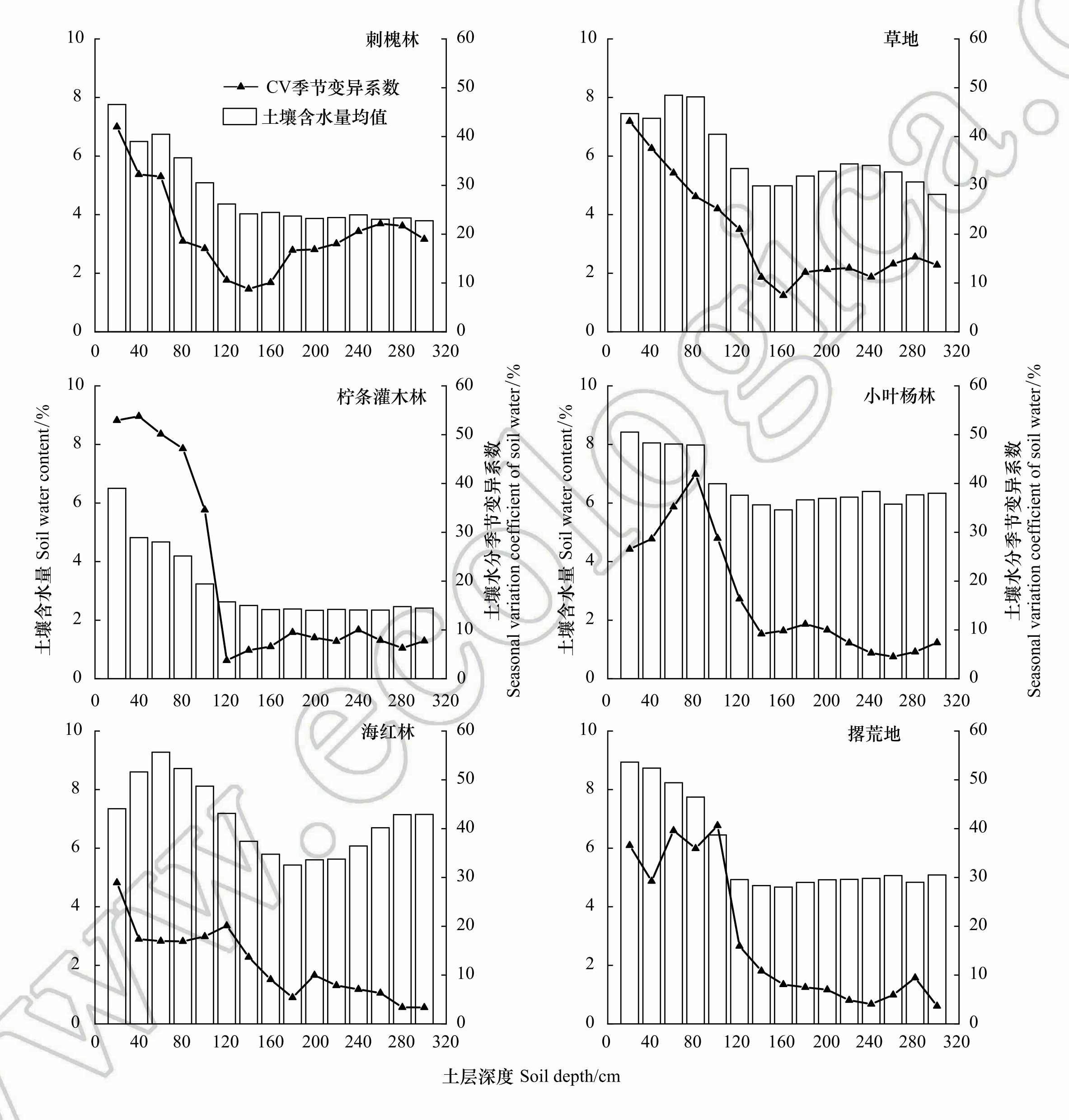


图 4 不同土地利用方式下不同土壤深度的土壤水分季节变异程度

Fig.4 The seasonal variation of soil water content under different soil layers of different land-use types

3 讨论

3.1 不同土地利用方式下土壤水分的垂直剖面分布特征

黄土丘陵区土层深厚,不同土地利用方式下土壤水分循环是比较单纯的降雨入渗、地表蒸发和植物蒸腾

的过程,反应在剖面上的土壤水分变异和动态表现出一定的层次性和差异性[18]。研究区内 6 种土地利用方式的土壤含水量,随着深度的增加,呈先增加再减少的趋势,且在 0—100 cm 土层土壤含水量随深度的变化剧烈,越到深层,土壤含水量随土壤深度的变化明显减弱。这与以往的研究结果基本一致。肖列等在研究黄土丘陵区不同土地利用方式对土壤水分及地上生物量的影响中同样表明,由于降雨的作用,天然草地、沙棘、柠条灌木林、苹果园、刺槐林等 10 种土地利用方式在 0—100 cm 土层的土壤含水量高,且土壤水分变异较大;100 cm 以下的土壤含水量相对稳定[16]。马骥等在研究六盘山地区不同林地土壤水分动态变化特征初探中也得出,不同林地土壤含水量在垂直剖面上的变化趋势相似,不同林地的土壤含水量随土壤深度的增加,基本具有先增加后缓慢减少的特征[19]。这主要是由于 0—100 cm 土体中土壤水分含量受降水的影响较大,土壤孔隙多,土壤干湿变化剧烈,越到土壤深层,土壤结构越紧实,土壤入渗能力下降,导致深层土壤水分维持稳定状态。可见,6 种土地利用方式的土壤含水量随深度的变化自上而下均呈“S”状分布,且随着土壤深度的增加土壤含水量先增加后减少。

土壤水分受降水、植被根系吸收水分的深度范围等因素的影响,形成不同的土壤水分活动层。本文中各土地利用方式下土壤水分活跃层分布在 0—100 cm 左右,这主要是因为黄土剖面上层的土壤处于水分补充和消耗的交替过程中,受降水和蒸发的影响较大,土壤含水量变化剧烈;随着土壤深度的增加,土壤水分状况则主要与植被利用类型有关。刺槐林、柠条灌木林和海红林的根系发达,随着林龄的增加,根系加深,根系生物量逐渐增加,根系吸水量增加,使得剖面土壤水分下降;而草地、撂荒地相对稳定层的形成是由于植被根系分布较浅,对深层土壤水分利用有限。梁一民等在研究黄土高原人工林草地土壤水分垂直变化特征中,根据林木根系吸收利用程度将土壤层划分为微弱利用层(0—20 cm)、利用层(20—160 cm)、调节层(160—300 cm)和微弱调节层(300—350 cm)4 个层次[20]。利用层和调节层分别与本研究中土壤活跃层和稳定层基本一致。另外,黄土丘陵区地下水埋藏较深,易造成深层土壤水分亏缺的状态,形成稳定的土壤干层,导致在 100 cm 左右就开始形成土壤水分相对稳定层。以上分析表明,降水、植被根系分布格局、生理生态特征等因素对土壤水分活动层产生不同程度的影响。降水主要影响土壤活跃层,随着深度的增加,植被根系分布空间格局对土壤水分的影响程度变大,土壤水分逐渐稳定,形成土壤相对稳定层。

3.2　不同土地利用方式下土壤水分的季节变化特征

由于降水的季节变异性,不同土地利用方式下土壤水分具有典型的季节变化特征,土壤水分除了与降水量有关,还与植被在不同生育期内的耗水特点、土壤蒸发等因素有关。这是植物生长规律与当地气候特点共同作用的结果[21]。本研究中,6 种土地利用方式土壤贮水量均具有明显的季节变化特征,土壤贮水量在 6 月最低,7—8 月土壤贮水量较 6 月有所上升,9 月略有降低,11 月达到观测期最高,土壤贮水量的季节变化趋势与降水的季节性协同。这与以往的研究基本一致。程立平等对陕西长武塬区 0—15 m 黄土剖面土壤水分的研究表明裸地、苜蓿地和苹果林地土壤干湿交替层的土壤贮水量因受降雨因素的影响较大,均具有相似的季节变化,而高产农田土壤贮水量的变化与作物类型有关系[22];王艳萍在研究黄土塬区不同土地利用方式下土壤水分特征中也表明,土壤贮水量的季节变异与该地季节性降水的变化趋势一致[5]。这主要是由于 6 月,植被逐渐开始进入生长季,所需水量日渐增加,气温回升,土壤蒸发旺盛,加之雨季未到,不能及时补充土壤蒸发等因素造成的土壤水分消耗;7—8 月,植被进入生长旺季,气温升高,植被蒸腾和土壤蒸发强度也随之增加,尽管此阶段进入雨季,降水量增多,但土壤水分蒸散量和植被蒸腾量较大,因此,土壤贮水量较 6 月有所上升,但未达到观测期内最大值。9 月,气温逐渐降低,土壤蒸发明显减弱,且植被进入生殖生长期末,耗水减少,加上雨季逐渐减退,降水量日渐减少,因此,9 月之后,各土地利用方式的土壤贮水量呈增长的趋势。以上分析表明,6 种土地利用方式在 0—300 cm 土层的土壤贮水量具有明显的季节变化特征,随时间的变化呈增长趋势。除此之外,本文研究发现各种土地利用方式的土壤贮水量的季节性变化在时间上滞后于降水量,这可能是由于土壤水分输送的距离较长,从而导致土壤水分的输送具有明显的滞后效应[23]。因此,土壤贮水量的季节性变化在时间上滞后于降水量。

3.3 不同土地利用方式下土壤水分季节变异程度的分层特征

本研究表明,6 种土地利用方式下土壤水分季节变异曲线的整体趋势基本一致,均表现出土壤浅层高,土壤深层低,变异系数随着深度的增加呈现出逐级递减且稳定的趋势。这与以往黄土区域的研究结果基本一致,马骥等发现六盘山地区不同林地土壤含水量变异系数随着土壤深度增加呈现减小趋势,且人工林地在 80 cm 以下受环境等因素影响减弱,趋于稳定状态[19];肖列等研究结果表明柠条、苹果、刺槐、玉米等不同土地利用方式下 0—100 cm 土层的土壤水分变化活跃,100 cm 以下土层土壤含水量随土层深度增加趋于稳定[16]。本研究区属于黄土丘陵区干旱半干旱区,具备典型的季风气候,干湿季明显,夏季降水多,蒸发旺盛,冬季降水少,蒸发减弱,浅层土壤水分含量受降水与气温的影响较大,越到土壤深层,土壤水分受降水等外部条件的影响越弱,季节变异越趋于稳定。此外,本研究还发现,小叶杨林的季节变异系数在土壤浅层出现相反的规律,即在 0—80 cm 土层范围内,表现出土壤水分季节变异系数随深度的增加而增加,这可能是因为研究区小叶杨林坡度较大,浅层土壤水分受坡度因素的扰动强烈,即使在雨季也难以长期储存水分。刘海隆等在对贵州岩溶区的土壤水分研究中得出,受坡度因素的影响,土壤水分变化差异极显著,受植物吸收和蒸发的影响,土地利用方式之间的土壤水分变化不一定都显著,这说明在黄土丘陵区也可能同样存在多因素综合作用的规律[24];因此,在后续研究中应补充和完善土壤坡度、坡向等立地条件下土壤水分分布特征的相关研究。

4 结论

(1)不同土地利用方式的土壤含水量具有典型的垂直剖面特征,随深度的变化土壤含水量先增加后减少,自上而下呈“S”状分布,在 0—100 cm 土层土壤含水量随深度的变化剧烈,越到深层,土壤含水量随土壤深度的变化明显减弱。不同土地利用方式下土壤水分的活跃层、次活跃层、稳定层的深度范围有别。受不同植被利用的影响,稳定层具有显著差异,乔灌林都消耗更多深层的土壤水分。

(2)不种土地利用方式的土壤贮水量具有明显的季节变异特征,随时间的变化呈增长趋势,在 11 月达到最大值,土壤贮水量由大到小依次为海红林>小叶杨林>撂荒地>草地>刺槐林>柠条灌木林,土壤贮水量随时间的变化趋势与降水随时间的变化趋势一致,但在时间上滞后于降水量。土壤水分季节变异系数曲线在 100 cm 土层左右出现明显的拐点,不同土地利用方式的土壤含水量的变异系数均随着深度的增加呈现出逐级递减的趋势,在土壤深层季节变异程度趋于稳定。

致谢:野外采样工作在山西省河曲县沙坪乡政府的支持下完成,特此致谢。

参考文献(References):

[1] 黄奕龙, 陈利顶, 傅伯杰, 张科萍, 王仰麟. 黄土丘陵小流域植被生态用水评价. 水土保持学报, 2005, 19(2): 152-155, 194-194.
[2] 莫保儒, 蔡国军, 杨磊, 芦娟, 王子婷, 党宏忠, 王多锋, 戚建莉. 半干旱黄土区成熟柠条林地土壤水分利用及平衡特征. 生态学报, 2013, 33(13): 4011-4020.
[3] 王国祥. 山西省科学造林研究. 太原: 山西科学技术出版社, 2012: 158-162.
[4] 黄奕龙, 陈利顶, 傅伯杰, 黄志霖, 贵立德, 吴祥林. 黄土丘陵小流域地形和土地利用对土壤水分时空格局的影响. 第四纪研究, 20 03, 23(3): 334-342.
[5] 王艳萍, 王力, 韩雪, 杨文强. 黄土塬区不同土地利用方式土壤水分消耗与补给变化特征. 生态学报, 2015, 35(22): 7571-7579.
[6] 刘春利, 邵明安. 黄土高原六道沟流域不同土地利用方式下土壤水力特性及其对土壤水分的影响. 应用生态学报, 2008, 19(11): 2400-2407.
[7] 白一茹, 邵明安. 黄土高原水蚀风蚀交错带不同土地利用方式坡面土壤水分特性研究. 干旱地区农业研究, 2009, 27(1): 122-129.
[8] 张北赢, 徐学选, 刘文兆, 杜峰. 黄土丘陵区不同土地利用的土壤水分灰色关联度. 生态学报, 2008, 28(1): 361-366.
[9] 王国梁, 刘国彬, 党小虎. 黄土丘陵区不同土地利用方式对土壤含水率的影响. 农业工程学报, 2009, 25(2): 31-35.
[10] 高鹏, 穆兴民. 黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤水分入渗的对比试验. 中国水土保持科学, 2005, 3(4): 27-31.
[11] 程立平, 刘文兆. 黄土塬区土壤水分分布特征及其对不同土地利用方式的响应. 农业工程学报, 2011, 27(9): 203-207.

[12] 夏江宝, 杨吉华, 李红云. 不同外界条件下土壤入渗性能的研究. 水土保持研究, 2004, 11(2): 115-117, 191-191.

[13] 贾宁凤, 段建南, 李保国, 李旭霖, 陈焕伟. 基于 AnnAGNPS 模型的黄土高原小流域土壤侵蚀定量评价. 农业工程学报, 2006, 22(1 2): 23-27.

[14] 段建南. 黄土高原土壤变化及其过程模拟. 北京: 中国农业出版社, 2001: 21-36.

[15] 贾宁凤, 李旭霖, 陈焕伟, 段建南, 李保国, 郭青霞. AnnAGNPS 模型数据库的建立——以黄土丘陵沟壑区砖窑沟流域为例. 农业环境科学学报, 2006, 25(2): 436-441.

[16] 肖列, 刘国彬, 薛萐, 张超. 黄土丘陵区不同土地利用方式对土壤水分及地上生物量的影响. 水土保持通报, 2016, 36(4): 204-209, 215-215.

[17] 王孟本, 李洪建. 柠条林蒸腾状况与土壤水分动态研究. 水土保持通报, 1990, 10(6): 85-90.

[18] 樊军, 郝明德, 邵明安. 黄土旱塬农业生态系统土壤深层水分消耗与水分生态环境效应. 农业工程学报, 2004, 20(1): 61-64.

[19] 马骥, 张维江. 六盘山地区不同林地土壤水分动态变化特征初探. 宁夏工程技术, 2016, 15(2): 167-170.

[20] 梁一民, 杨文治. 黄土高原人工林草地水分生态条件及生产力//杨文治, 余存祖. 黄土高原区域治理与评价. 北京: 科学出版社, 19 92: 241-297.

[21] 马月存, 秦红灵, 高旺盛, 陈源泉, 李向东, 隋鹏, 黄凤球. 农牧交错带不同耕作方式土壤水分动态变化特征. 生态学报, 2007, 27(6): 2523-2530.

[22] 程立平, 刘文兆, 李志. 黄土塬区不同土地利用方式下深层土壤水分变化特征. 生态学报, 2014, 34(8): 1975-1983.

[23] 胡良军, 邵明安. 黄土高原植被恢复的水分生态环境研究. 应用生态学报, 2002, 13(8): 1045-1048.

[24] 刘海隆, 蒋太明, 刘洪斌, 肖厚军, 夏锦慧. 不同土地利用方式对岩溶山区旱坡地土壤水分时空分异的影响. 土壤学报, 2005, 42(3): 428-433.